

# K-NET を用いた地震観測記録に基づく 非定常ランダム入力モデルの構築

中川 肇\*

Non-Stationary Random Input Model based on the Earthquake Observation Records with K-NET

Hajime NAKAGAWA

## ABSTRACT

This paper presents the estimation of non-stationary random parameters based on the earthquake observation records with K-NET. The non-stationary random parameters are the amplitude level  $\sigma_f$ , the predominant angular frequency  $\omega_g$  and the shape factor  $h_g$  of the earthquake excitation.

These random parameters are calculated for the active faulting destruction and the plate boundary earthquakes, respectively. The active faulting destruction earthquakes are the 2004 Mid-Niigata Prefecture, the 2005 West offshore of Fukuoka Prefecture, the 2007 Noto peninsula and the 2008 Iwate-Miyagi inland earthquakes. The plate boundary earthquakes are the 2003 Tokachi offshore (southeast offshore of Hokkaido) and the 2004 Southeast offshore of Kii peninsula earthquakes.

**KEY WORDS:** K-NET, earthquake observation records, non-stationary random parameters, active faulting destruction type earthquake, plate boundary type earthquake

## 1. 序

1995年の兵庫県南部地震以後、日本各地の地震観測網が整備され、(独)防災科学研究所が管轄する地震観測システム K-NET<sup>1)</sup>では、北海道から鹿児島県まで1035地点に地震計が設置され、地震発生後、即座に観測記録を入手し分析することは可能になっている。このシステムを利用する教育、研究者はかなり多い。ここで、兵庫県南部地震以後、発生したマグニチュード(M)6以上の地震<sup>2)</sup>について紹介する。2003年9月26日午前4時50分、釧路沖を震源とするM8.0の十勝沖地震が、2004年9月5日午後11時57分、紀伊半島南東沖を震源とするM7.4の紀伊半島南東沖地震が発生した。十勝沖地震は震源の深さ60kmのプレート境界地震で、釧路市など波高1.2mの津波が観測され、また苫小牧市は不整形な堆積盆地上に位置していたため、継続時間が長く低振動数成分の多い揺れを観測している。所謂、「やや長周期地震動」の存在が確認されている。

一方、紀伊半島南東沖地震はプレート内部破壊地

震で、2035年～2040年に発生することが懸念されている想定東南海地震震源域周辺で発生したが、地震の発生メカニズムが異なり、南海、東南海地震の前兆を示すものではなかった。しかし、関西圏特に、大阪平野などの堆積盆地構造では、十勝沖地震のように、地震動が盆地内で反射と屈折を繰り返し、兵庫県、大阪府内で「やや長周期成分」が観測されている。それ以降、2004年10月23日午後5時56分、中越地方を震源とするM6.8の内陸活断層破壊地震が、2005年3月20日午前10時53分、福岡県北西沖の玄海灘浅部を震源とするM7の内陸活断層破壊地震が、2007年3月25日午前9時42分、能登半島沖を震源とするM6.9のプレート内部破壊地震が発生している。新潟県中越地震など、震源の深さが浅い地震では、余震が数百回以上続き、地震動の卓越周期が低く木造住宅等に甚大な被害を及ぼしている。以上のように、日本は地震活動期にあると言っても過言ではない。地震発生後に即座に地震動特性の分析が可能になった今、地震予知に関する研究が急速に発展すべきと考える。

地震観測記録に基づく構造物の確定論的応答解析では、入力地震動の特性により応答にかなりバラ

\*建築学科

ツギが生じ、構造物の性能を適切に把握することが難しい。筆者は長年、地震動は非予測性、非規則性をもつランダム現象と位置づけ、非定常な確率論的地震入力モデルを構築し、平均的な意味での応答予測に適用している。

本論では、兵庫県南部以後発生している 5 つの地震観測記録に基づく内陸活断層破壊型、やや長周期地震型ランダム入力モデルを構築し、非定常ランダムパラメータを抽出する。

2008 年 6 月 14 日午前 8 時 43 分、岩手県内陸部を震源とする岩手・宮城内陸地震が発生し、その地震動特性について検討し、非定常ランダムパラメータを同様に抽出する。

## 2. 岩手・宮城内陸地震の地震動特性の評価

2008 年 6 月 14 日、午前 8 時 43 分、岩手県内陸部を震源とする活断層破壊地震(岩手・宮城内陸地震)が発生した。この地震では、死者 13 名、負傷者が 449 名で、建築物よりむしろ大規模な円弧地滑りが発生し山体崩壊を示している。図 1 には、震源地と観測地点の位置関係を示している。図中の示している黒丸は観測地点を示しており、本章では、MYG004 (築館)、MYG005 (鳴子)、IWTH010 (一関)、MYG010 (仙台) で観測された地震記録を基に、スペクトル特性について検討する。

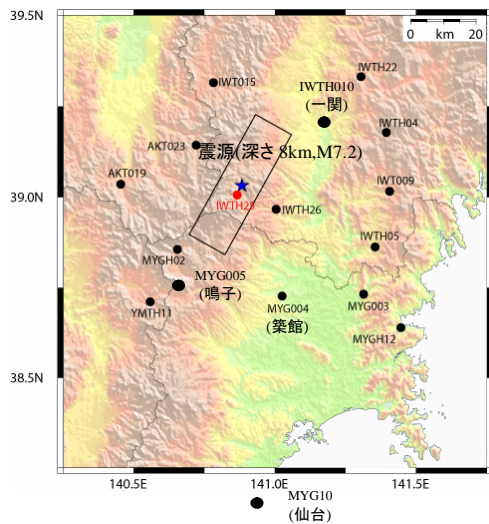


図 1 震源位置と観測地点 1)

図 2 は 4 箇所の観測地点での加速度波形 (NS 成分) を示している。図 3 は図 2 の加速度波形を大崎 3) の手法を適用し速度波形に変換している。図 2、3 より、築館、仙台、一関での加速度波形は地震発生後、約 20~25 秒までは内陸型の地震動波形を示し

ているが、25 秒以降、やや長周期の成分を示す波形が観測できる。一方、鳴子での加速度波形は 20 秒付近までは、内陸型の地震動を示し、20 秒以降、内陸型とは全く異なる長周期成分を有する波形に変化していることが判る。図 3 より鳴子での速度波形は他の速度波形とは異なる。これは、この地震の震源付近は火山灰が堆積する山間部であり、活断層破壊で発生した地震で堆積層が大きく振動し円弧状に崩壊し 3 秒付近の卓越周期を有する地震動に変化したものと推察される。

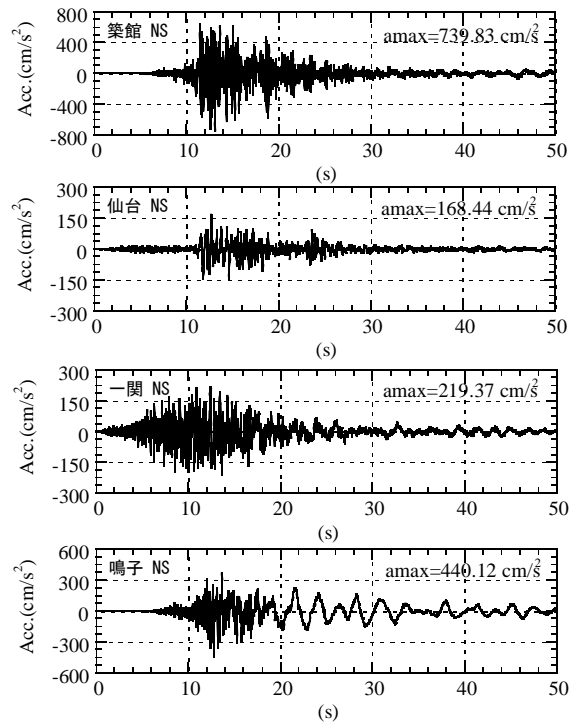


図 2 加速度波形

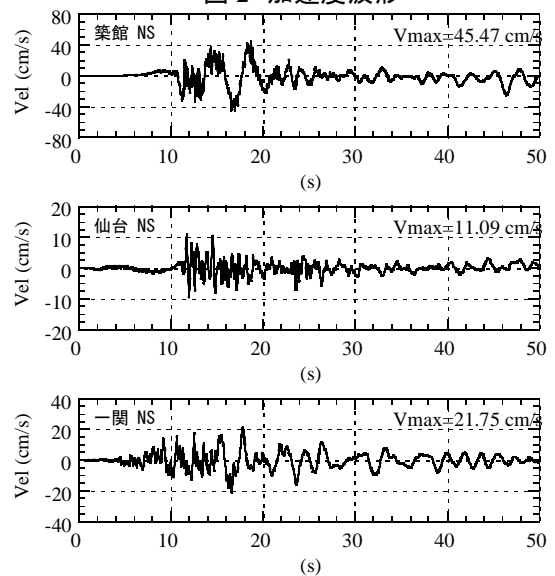


図 3 速度波形

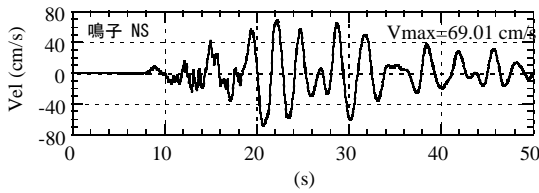


図3 速度波形 (Continued)

図4には、図2の加速度波形に基づく速度応答スペクトルを描いている。図4より、仙台での卓越周期は0.56秒で一般的な内陸型地震と言えるが、築館では0.18秒以外に3.72秒に卓越周期を示し、一関、鳴子では、短周期成分に卓越がなく、2.28秒、3.27秒のやや長周期成分が卓越していることが判る。このことから、上述したようにこの地震は内陸型地震動であるが、震源地付近の地盤構成が軟弱な堆積層であり、結果としてやや長周期成分を得られたと考えられる。

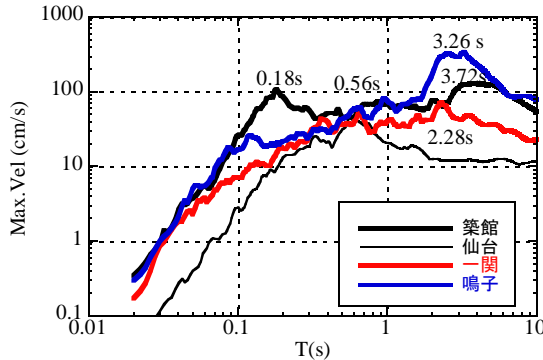


図4 速度応答スペクトル

### 3. 非定常ランダム入力モデルの構築

#### 3.1 非定常ランダムパラメータの評価<sup>4), 5)</sup>

地震加速度波形の非定常スペクトル $S_f(\omega, t)$ は次式のように表現できる。

$$S_f(\omega, t) = \frac{1}{T_W} \left| \int_{t-\frac{T_W}{2}}^{t+\frac{T_W}{2}} f(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \right|^2 \quad (1)$$

ここで、 $T_W$ は非定常スペクトル計算のウィンドウ幅で、 $T_W$ は地震入力波形の継続時間の1/10とする。

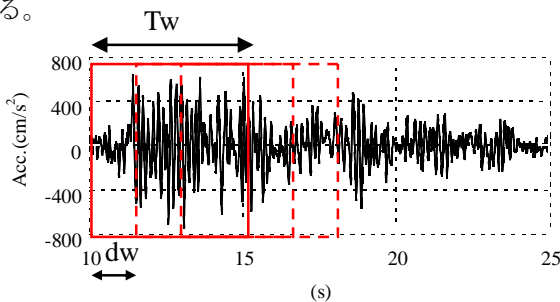


図5 非定常スペクトルのウィンドウ幅と移動量

(1)式の非定常スペクトルを計算するために、図5のようにウィンドウ幅 $T_W$ を移動量 $dw (= T_W/2^n)$ だけ移動させ非定常スペクトルを算出する。 $dw$ を求める際の $2^n$ は $T_W$ に最も近い値を用いる。例えば、 $T_W = 5.12$ 秒の場合、 $2^n = 8$ となり、 $dw = 0.64$ 秒となる。

(1)式に対応する非定常スペクトルモーメント $\lambda_j(t)$ は次式のように定義する。

$$\lambda_j = \int_0^\infty \omega^j S_f(\omega, t) d\omega \quad (2)$$

ここで、 $j = 0, 1, 2$ であり、本論で計算する地震入力モデルを非定常なパラメータをもつ1質点線形フィルターの出力過程とする。

非定常スペクトルモーメント(パワースペクトル密度) $S_f(\omega, t)$ は自己相関関数 $R(t)$ にフーリエ変換を施して算出されるため、入力地震動の振幅包絡関数 $\sigma_f(t)$ は、次式のように表現できる。

$$\sigma_f^2(t) = R(0) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty S_f(\omega, t) d\omega = \frac{1}{\pi} \lambda_0(t) \quad (3)$$

本論で抽出する非定常ランダム入力パラメータは、(3)式の振幅包絡関数 $\sigma_f(t)$ 、地震動の卓越振動数 $\omega_g(t)$ 及びスペクトルの形状係数 $h_g(t)$ である。

地震動の卓越振動数 $\omega_g(t)$ は、次式のような計算により求める。

$$\omega_g(t) = \sqrt{\lambda_2(t)/\lambda_0(t)} \quad (4)$$

また、スペクトルの形状係数 $h_g(t)$ は、(2)式の非定常スペクトルモーメントが(5)式の金井-田治見モデル<sup>7)</sup>による理論スペクトルモーメントに等値するように、(6)式のような目的関数 $J(t)$ を設定し、1変数の変分問題に帰着させ求める。

$$\bar{\lambda}_j(t) = \int_0^\infty \omega^j \frac{4h_g^2 \omega_g^2 \omega^2 + \omega_g^4}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4h_g^2 \omega_g^2 \omega^2} S_0 d\omega \quad (5)$$

ここで、 $S_0$ はパワースペクトル密度関数である。

$$J(t) = \sqrt{1 - \frac{\lambda_1(t)^2}{\lambda_0(t)\lambda_2(t)}} - \sqrt{1 - \frac{\bar{\lambda}_1(t)^2}{\bar{\lambda}_0(t)\bar{\lambda}_2(t)}} = \varepsilon; \varepsilon = 1.0 \times 10^{-6} \quad (6)$$

#### 3.2 非定常ランダム入力モデルの数値計算例

本節では、3.1節で述べた非定常ランダム入力パラメータを算出するために、数値計算例として、内陸型地震動として新潟県中越、能登半島、福岡県西

方沖、岩手・宮城内陸地震(一関)の4ケース、海洋型地震動として十勝沖、紀伊半島南東沖地震の2ケースを示す。図6、図7には、夫々の地震の加速度波形(NS成分)及び速度応答スペクトルを描いている。図7-(a)より、4つの内陸型地震動の卓越周期は夫々異なるが、概ね0.56~0.7秒付近に存在する。一方、図7-(b)より海洋型地震動の場合、卓越周期は概ね3.45~4.0秒付近に存在し「やや長周期成分」で卓越していることが判る。

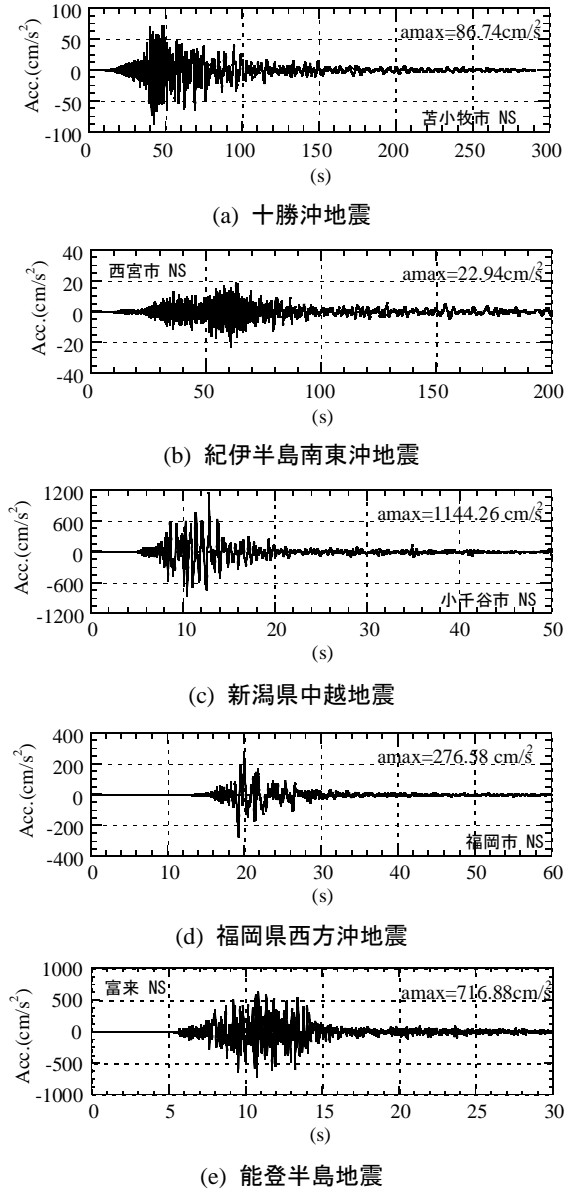


図6 入力地震動波形

表1は図2、6の夫々の地震動の最大加速度、最大速度、継続時間を示している。なお、継続時間は地震の入力エネルギーは(7)式に示すように全入力エネルギーの5~95%になるように算出している。

$$E_1(t) = \int_0^t \ddot{x}_g(\tau)^2 d\tau \quad (7)$$

図8に(7)式のエネルギー応答を十勝沖地震に対して計算した結果を示す。

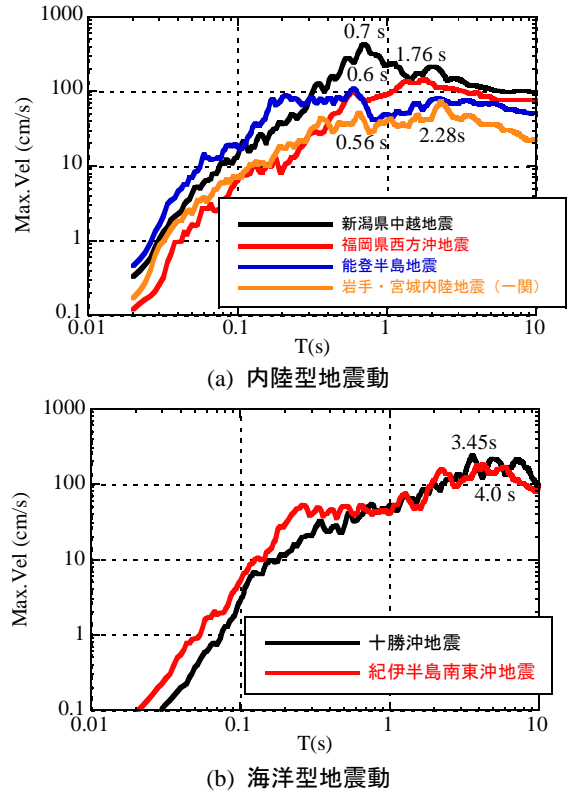


図7 速度応答スペクトル

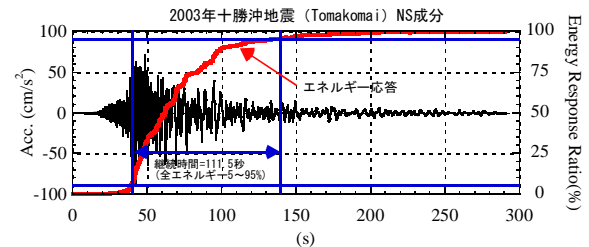


図8 地震動の継続時間の推定

表1 入力地震動の諸元

地震名	最大加速度 (cm/s <sup>2</sup> )	最大速度 (cm/s)	継続時間 (s)
十勝沖	86.74	32.55	111.5
紀伊半島南東沖	22.94	5.58	130.3
新潟県中越	1144.26	97.48	23.4
福岡県西方沖	276.58	60.14	14.9
能登半島	716.88	37.45	14.6
岩手・宮城内陸	219.37	21.75	37.3

図9には、3.1節で述べた地震観測記録に基づく非定常ランダム入力パラメータ ( $\sigma_f, \omega_g, h_g$ ) が、2つの海洋型地震と4つの内陸型地震に対して描かれている。ここで、図9の縦軸、横軸は夫々、各時刻

での振幅包絡線関数 $\sigma_f$ をその最大値で除した値、時刻 $t$ を表1に示した継続時間で除した無次元時間 $\tau$ としている。図9より、十勝沖型、紀伊半島南東沖型のランダム入力モデルでは、 $\tau=0.2\sim 0.3$ 付近で $\sigma_f$ はピークを持ち、 $\tau=0.5\sim 0.8$ 付近に2次ピークを示していることが判る。一方、新潟県中越型、福岡県西方型、能登半島型では、 $\sigma_f$ は主要動付近でピークを持ち、その後は0に漸近していることが判る。内陸型と海洋型では、概ね単峰型の特性を示すが、海洋型で長周期成分が卓越し、継続時間が非

常に長くなり、 $\tau=0.5\sim 0.8$ 付近で2つ目の山が存在する。また、地震動の卓越振動数 $\omega_g$ は海洋型では $\tau=0.0\sim 0.2$ 付近は振動数が高く、その後、反比例曲線を描き低振動数側に移行していくことが判る。一方、内陸型では卓越振動数 $\omega_g$ はあまり変動せず、概ね $15\sim 20\text{rad/s}$ 付近を推移しており、 $10\text{rad/s}$ 以下になることはない。さらに、スペクトルの形状係数 $hg$ は能登半島型を除き地震動特性にあまり影響を受けず、 $0.2\sim 0.6$ を推移していることが判る。

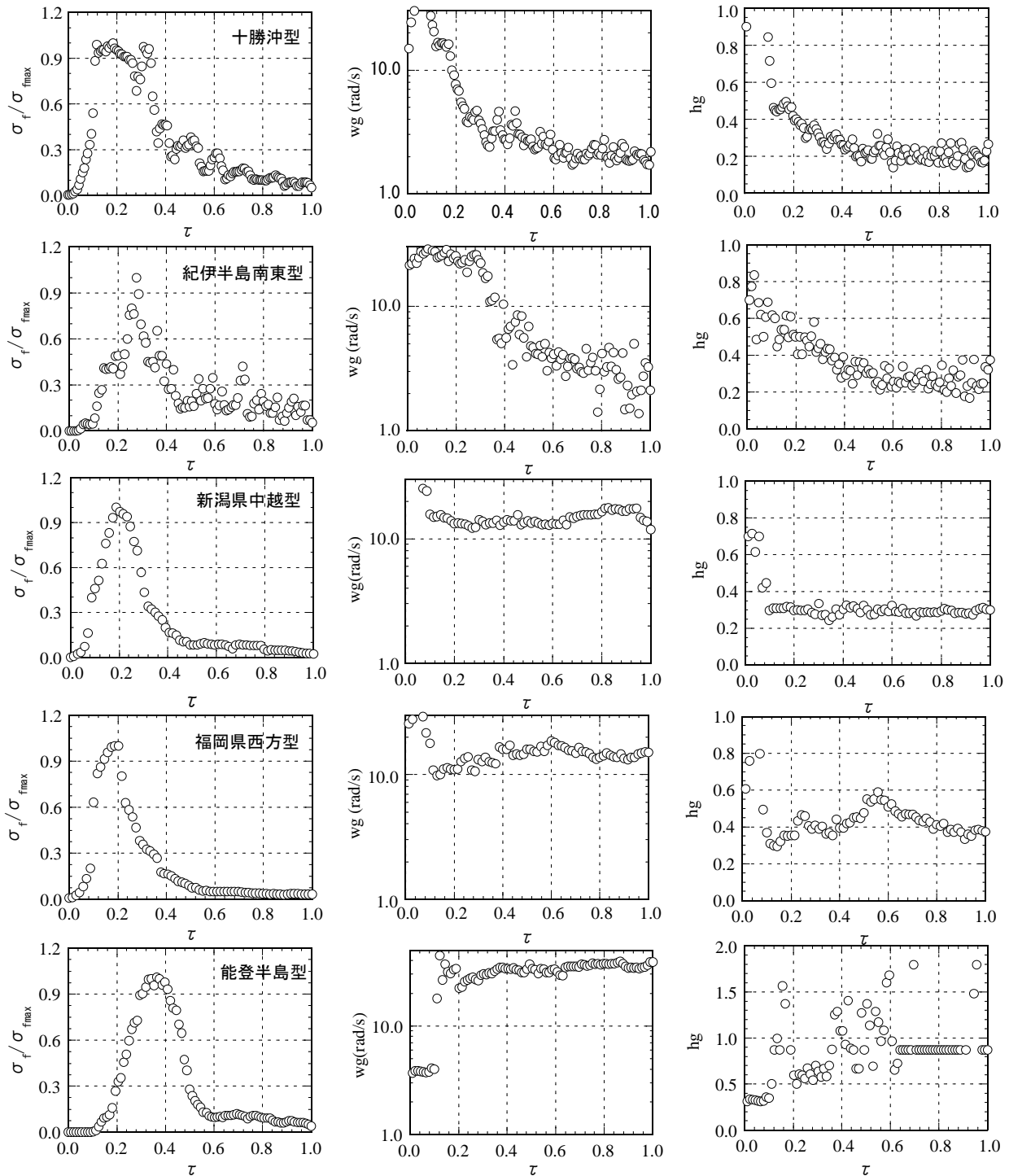


図9 非正常ランダム入力モデル

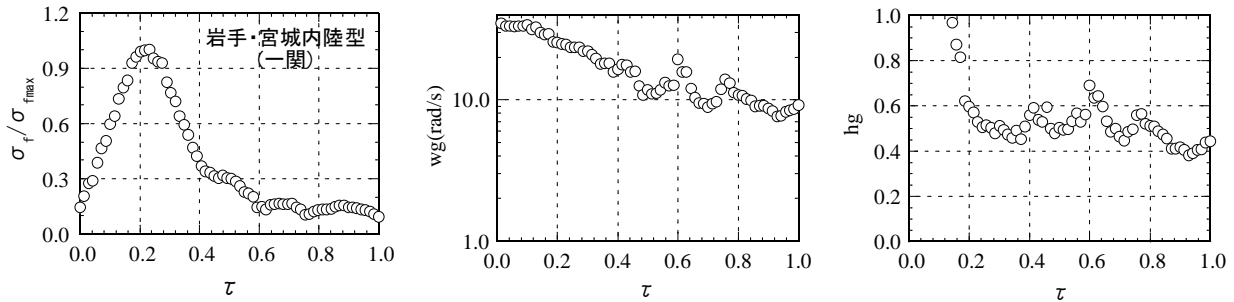


図 9 非定常ランダム入力モデル (Continued)

図 9 で得られた非定常ランダム入力パラメーの平均値を表 2 に示す。尚、 $\sigma_f$  は最大速度 100cm/s に規準化している。

表 2 非定常ランダム入力モデルの平均値

地震動名	$\sigma_f (cm/s^2)$	$\omega_g (rad/s)$	$h_g$	$t_d (s)$
十勝沖型	266.5/3	2.94	0.323	111.5
紀伊半島型	411.1/3	6.92	0.375	130.3
新潟県中越型	1173.6/3	16.24	0.400	23.4
福岡県西方型	459.9/3	15.41	0.468	14.9
能登半島型	1914.2/3	33.66	0.491	14.6
岩手・宮城型	1008.6/3	17.26	0.739	37.3

## 6. 結語

1995 年の阪神淡路大震災以後、急速に日本各地の地震観測網が整備され、即座に地震動の分析が可能になった。一方、筆者は長年、地震動が非予測性、非規則性を示すランダム現象と位置づけ、確率論的地震応答解析の観点から免震、制震構造物の最適設計について論じている。本論では、まず、2008 年 6 月の岩手・宮城内陸地震の地震動特性について考察し、次いで地震観測システムの代表である K-NET を利用し、海洋型、内陸型の地震観測記録を基に、非定常ランダム入力モデルの構築及びそのパラメータを算出した。本論の解析結果から非定常ランダム入力モデルについて軽々に結論を述べることはできないが、それらが示す工学的知見を述べる。

- (1) 岩手・宮城内陸地震は震源の深さが 8km の内陸活断層破壊地震であるが、震源近傍の観測地点での解析結果から内陸型地震動とは言い難い。震源付近の地盤構成において火山灰が堆積した軟弱層であり、強震動の影響により地震動の卓越周期が 0.6 秒と 3.0~4.0 秒付近に存在している。
- (2) 地震動の振幅包絡線関数は内陸型、海洋型とも概ね単峰型を示す。海洋型に関しては、地震動の継続時間が長く、2 次ピークが地震動の揺れの後半で存在する。

- (3) 地震動の卓越振動数は海洋型では、短周期成分から長周期成分に移行するが、内陸型では短周期成分を推移している。一方、スペクトルの形状係数は海洋型、内陸型にあまり依存せず、概ね 0.2~0.6 を推移している。

なお、本論で得られた非定常ランダム入力モデルは免震・制震構造の最適設計に適用可能であり、複合免震装置の最適設計については、稿を改めて論じたいと思う。

## 謝辞

本論で採用しました十勝沖、紀伊半島南東、新潟県中越、福岡県西方沖、能登半島、岩手・宮城内陸地震での観測記録は、独立行政法人防災科学技術研究所 (K-NET) より使用させて頂きました。ここに深く謝意を表します。

## 参考文献

- 1) (独) 防災科学研究所: 地震観測システム K-NET
- 2) 岡田義光: 最新日本の地震地図、東京書籍、(2006)
- 3) 大崎順彦: 新・地震動のスペクトル解析入門、鹿島出版会、pp.133~138、(1994)
- 4) Lai, S.P: Statistical characterization of strong ground motions using power spectral density function, Bulletin of Seismological Society of America, Vol.72, No.1, pp.259~274, (1982)
- 5) 浅野幸一郎: 地震入力パラメータの変動を考慮した構造物の動的応答、日本建築学会構造系論文報告集、第 400 号、pp.123~130、(1989)
- 6) 柴田明徳: 最新耐震構造解析、森北出版、pp.171~181、(1981)
- 7) Tajimi, H.: A Statistical Method of Determining the Maximum Response of a Building Structure during an Earthquake, Proc. of the 2nd World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, Japan, Vol.II, pp.781~797 (1960)